

基于电压稳定的区域电网无功能力评价

杨琪, 李华强

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 区域电网无功能力作为电力网络安全运行的一个重要指标, 直接关系到电力系统的经济性、安全性和可靠性。但目前研究主要集中在无功优化等方面, 缺乏一种直接评价电网无功能力的方法。因此, 结合静态能量函数提出了区域电网无功能力评估的新方法。首先, 在保证电压稳定的情况下, 通过内点法求出稳定运行状态情况下各节点参数以及在极限情况下的系统崩溃点数据, 然后运用静态能量函数的思想获得各个运行状态下的能量函数值, 最后建立表征区域电网无功能力的指标。阐述了新方法的应用背景和实现原理, 并对 IEEE-30 标准测试系统进行仿真分析, 仿真结果证实了该方法的准确性和有效性。

关键词: 无功能力; 能量函数; 内点法; 电压稳定

Regional power system reactive power capability based on voltage stability

YANG Qi, LI Hua-qiang

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Regional power system reactive capability is connected with the economy and reliability of power system as an important index in power system. In this paper, a method based on the static energy function is proposed to judge the regional power system reactive capability, considering voltage stability limits. Firstly, ensuring the voltage is stable, getting the data of each node by using interior point method, secondly, according to the static energy function, it is to obtain the value of energy function under different conditions, and considering the value as the index of measuring regional power system reactive power capability. The research of regional power system reactive power capability based on static energy function is feasible, whose validity and rationality are identified by the simulations in IEEE30 bus system.

Key words: reactive power capability; energy function; interior point method; voltage stability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0019-05

0 引言

目前, 电力系统正朝着大型化、复杂化方向发展。因此电压稳定性是关乎电网安全稳定运行的重要内容。而系统的电压水平又与电网的无功能力有密切联系。与之相关的, 无功优化的研究一直是电力系统研究的热点, 出现了很多种方法。如各种非线性规划法^[1,2], 动态规划法^[3], 内点法^[4-9]以及现代启发式优化算法^[10-16]。

而目前国内外还没有关于直接建立指标来评估区域电网无功能力。因此, 本文将从系统能量的角度, 建立一个指标, 展开对电网区域电网无功能力评价的研究。主要研究内容包括计算在满足电压稳定情况下系统各个节点的电压和能量函数值, 并建立无功能力评价指标。

区域电网是指从调度角度所管辖的电网, 系统

区域无功能力是评估区域内电压稳定性和可靠性的重要指标, 系统规划者可以利用这一指标作为其实时调度的重要依据。

能量函数法的基本思想是定义反映系统状态的函数, 在 50 年代期间, 许多专家学者将能量函数引入到电力系统暂态稳定性分析中, 展开了对电力系统能量函数模型的构造。而现在, 构造适合电力系统的能量函数^[17-19]依然是直接法研究不断发展的重要内容。能量函数表达式的确定以及临界能量的确定, 使得能量函数法更易与实际电力系统相结合, 为电力系统运行中的电压安全、发电机出力调度以及系统的暂态稳定控制等方面发挥作用。

1 基于能量函数的数学模型

1.1 采用内点法的电压计算

确定负荷节点的静态能量值的关键必须先计算

负荷节点的电压。因此, 求取负荷节点的静态能量函数值包括以下 2 个环节:

- ①各个负荷节点电压的计算;
- ②此时负荷节点的能量值计算;

例如, 在系统临界情况下, 当满足电压稳定的条件时, 临界崩溃点电压计算可以描述为: 在同时满足系统的各种运行约束时, 对于系统负荷增加到运行极限点(距离运行崩溃点 10% 的负荷裕度)或电压接近可行电压边界的临界点电压。因此, 临界崩溃点的电压计算从本质上来讲可以看作是一个优化问题。下面运用内点法求解临界情况下各个负荷节点电压。

将电压崩溃点的求取看作非线性目标函数的优化问题, 它以总负荷视在功率最大或任意负荷节点的有功功率最大作为目标函数, 考虑发电机的无功出力以及 OLTC (On-Load Tap Changers) 等各种约束条件, 其数学模型可归纳为:

$$\begin{aligned} & \min(-\lambda) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ G_{\min} \leq G(x) \leq G_{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(x, \lambda) = [f_1(x), \dots, f_m(x)]^T$ 为扩展潮流方程组; $x \in R^n$ 为状态控制变量; $h(x) = [h_1(x), \dots, h_m(x)]^T$ 为常规潮流方程; $G(x) = [G_1(x), \dots, G_r(x)]^T$ 为安全约束条件; G_{\min}, G_{\max} 为安全约束条件上下限; $y_d \in R^m$ 为负荷变化方向; $\lambda \in R^1$ 为反映负荷水平的参数, $\lambda=0$ 为基态水平。

具体到文中的计算, 在考虑电压稳定约束时, 临界电压数学模型可表示如下:

$$\begin{aligned} & \min(-\lambda) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} f(x, \lambda) = (\lambda + \lambda_s) y_d + h(x) = 0 \\ \underline{P}_{Ri} \leq P_{Ri} \leq \bar{P}_{Ri} \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} \\ V_i \leq \bar{V}_i \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: P_R 为发电机有功限制; Q_R 为发电机无功限制; V_i 为母线电压幅值; 其中: λ_s 为系统始终保持电压稳定的裕度, 本文取基态情况下总负载的 10%。算法中无功按照一定的方式增长。

原始-对偶内点法的主要步骤为:

(1) 引入松弛变量, 将不等式约束转化为等式约束;

(2) 利用拉格朗日方法将带约束的优化问题转化为无约束的优化问题;

(3) 利用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件得到一系列的非线性方程;

(4) 利用牛顿法求解上述的非线性方程。

1.2 节点能量函数的计算

暂态能量函数在电力系统暂态稳定性中的应用, 目前已具有比较成熟的理论基础。而将静态能量函数^[20]用于区域电网无功能力评估, 目前还没有应用。

根据线路功率输送关系, 可得到多母线系统中各节点功率平衡等式:

$$\begin{aligned} f_i(\delta, U) &= P_{Li} - \\ & U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} g_i(\delta, U) &= (U_i)^{-1} [Q_{Li} - \\ & U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j))] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: P_{Li} 是节点 i 的注入有功; Q_{Li} 是节点 i 的注入无功; G_{ij} 是节点 i, j 之间的电导; B_{ij} 是节点 i, j 之间的电纳; δ_i, δ_j 是节点 i, j 的电压相角。

负荷节点的静态能量函数表达式^[18]为

$$E_L(X, X^s) = \int_{X^s}^X [f(\delta, U), g(\delta, U)] \cdot \begin{bmatrix} d\delta \\ dU \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式 (3)、(4) 代入式 (5), 可得多母线系统中第 i 节点的静态能量函数 E_{Li} 的表达式:

$$\begin{aligned} E_{Li} &= \int [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \int_{\delta_i^s, U_i^s}^{\delta_i, U_i} [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \\ & P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} - \\ & U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} + \\ & Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} - \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} \end{aligned} \quad (6)$$

其中: (U_i, δ_i) 为当前运行情况下各个负荷节点电压值, 若为临界值则表示节点临界能量函数。

(U_i^s, δ_i^s) 为系统处于稳定运行点的电压值。

如果考虑并联电容器补偿, 则式(6)修改为:

$$\begin{aligned}
E_{Lci} &= \int [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \int_{\delta_i^s, U_i^s}^{\delta_i, U_i} [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \\
&P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \\
&Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} - U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \\
&\sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \\
&\sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \\
&\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2} [(U_i)^2 - (U_i^s)^2]
\end{aligned} \quad (7)$$

系统负荷侧的总能量是系统所有负荷节点能量的迭加, 因此根据式(6)或式(7)可得系统负荷侧的总静态能量为:

$$\begin{aligned}
E_{Lt} &= \sum_{i=1}^n E_{Lcri} = \\
&\sum_{i=1}^n P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} - \\
&\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s}^{\delta_i} + \\
&\sum_{i=1}^n Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i} - \\
&\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s}^{U_i}
\end{aligned} \quad (8)$$

如果考虑并联电容补偿, 则系统负荷侧的总静态能量表达为

$$E_{Lct} = E_{Lt} - \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2} [(U_i)^2 - (U_i^s)^2] \quad (9)$$

2 区域无功能力评价指标

2.1 区域电网整体无功能力评价指标

当系统负荷增加时可能首先造成系统局部电压失稳, 进而影响到整个电网的安全运行。通过建立无功能力评价指标, 我们可以根据无功能力指标大小判断在系统负荷增加过程中系统的电压稳定能力。

在求出满足电压稳定条件下区域电网各节点电压及相应负荷节点能量函数信息后, 由上一节的内

容可知, 负荷节点的无功能力与本节点的静态能量函数值有直接关系, 节点的极限能量函数值越大说明该节点的无功能力越强。

但对一个完整的系统而言, 若单独计算各个节点的极限能量函数值并将其求和结果作为衡量区域电网无功能力的指标的话, 在实际应用时会有很大的局限性。因为当系统达到极限运行状态(即无功负荷达到最大时), 濒临电压崩溃点的时候, 并不一定是每个负荷节点电压都达到极限值, 而极限能量值计算是基于极限电压进行计算求得, 若以各个节点极限能量函数值相加, 衡量的无功能力超出了系统实际无功能力, 不符合区域电网实际运行情况。因此, 为更好的评价区域电网整体无功能力, 应直接利用系统在濒临电压崩溃点的极限运行条件下各个节点的静态能量值, 此时虽然并不是所有节点的电压都达到极限电压, 但符合电网实际运行情况。

为此引入指标 λ_{total} 衡量区域电网整体无功能力:

$$\lambda_{total} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (10)$$

λ_{total} 表示系统在满足电压稳定条件下整体无功能力。值越小说明节点无功能力越弱, 反之越强。

给定系统的最大无功能力出现在系统临界情况下, 此时系统的无功能力最大, 对应指标为 λ_{max} 。 λ_{total} 为一纵向指标, 对于区域电网在不同的运行方式下 λ 值一定小于 λ_{max} , 系统运行人员可通过实时得出的 λ 值来对比得出系统无功能力大小, 并采取相应的措施维护电网安全稳定运行。

2.2 节点实时无功能力评价指标

在评价电网系统无功能力时, 若只是评价区域电网整体的无功能力是不够的, 在运行时, 还有必要了解在不同运行情况下各节点实时的无功能力。

在保证系统电压稳定条件下, 比如在系统电压崩溃时, 并不一定所有负荷节点的电压都已达到临界值, 因此各个节点对应的能量函数值并不都是极限能量函数值。其中薄弱节点电压下降严重, 其能量函数值已达到或接近极限能量值, 其节点静态能量值最大, 但是其实时无功能力已经很弱, 不能再承受更大的无功负荷。对于其它节点, 电压下降不厉害, 对应的静态能量函数值较小, 此时这些节点仍然具有一定的无功能力。因此, 在评价节点实时无功能力的时候, 依然直接采用能量函数值显然是不可行的。

为了能整体评价节点实时无功能力, 当系统运行在不同条件下时, 根据各个负荷节点的电压值和对应能量函数值, 本文建立指标 η_i 来评价节点实时

无功能力:

$$\eta_i = \frac{V_i}{E_i} \quad (11)$$

其中: V_i , E_i 分别为不同运行条件下节点 i 的实时电压值及实时能量值。

η 值越小说明节点无功能力越弱, 反之越强。

引入指标 η 可有效说明在考虑整体运行的前提下, 各种运行条件下负荷节点的无功能力。因为由式(5)可知, 若极限情况下节点电压较低, 则对应较高的能量函数(上一节证明节点在电压最低的崩溃点时对应最大的极限能量值), 反之则较高的电压值对应较小的能量函数值。因此, 电压较低节点 η 指标较小, 表示该节点无功能力很差; 而电压较高节点 η 指标较大, 说明该节点还具有一定无功能力。

3 仿真

将本文方法应用于 IEEE-30 节点标准测试系统, 该系统共包括 6 台发电机和 30 个节点, 6 台发电机分别安装在 1、2、5、8、11、13 节点, 其中在节点 10、24 并联电容器进行无功补偿。节点 3、4、7、10、12、14、15、16、17、18、19、20、21、23、24、26、29、30 为负荷节点。在仿真计算中将 IEEE30 节点系统中的发电机设为 PV 节点。

3.1 计算过程

(1) 节点电压计算

首先运用内点法计算在满足电压稳定条件下, 无功负荷按照一定的方式增长时, 系统临界崩溃条件下各个节点的电压。

计算结果见表 1。

表 1 临界情况时节点电压表

Tab.1 Critical voltage value in every load node

节点	电压	节点	电压
1	1.06	16	0.909 59
2	1.004 2	17	0.891 87
3	0.953 45	18	0.876 61
4	0.930 91	19	0.872 54
5	0.943 67	20	0.876 75
6	0.915 09	21	0.861 31
7	0.918 03	22	0.856 54
8	0.912	23	0.833 64
9	0.923 47	24	0.769 41
10	0.893 12	25	0.694 68
11	0.974 68	26	0.500 25
12	0.936 23	27	0.748 95
13	0.970 84	28	0.889 9
14	0.907 48	29	0.665 93
15	0.889 71	30	0.671 47

(2) 静态能量函数值计算

在求解出各个节点临界电压的前提下, 可由公式(7)得到各个负荷节点的静态能量函数值。稳定运行时的数值取基态正常运行潮流情况下的数值。

各个负荷节点的静态能量函数值见表 2。

表 2 负荷节点能量函数值表

Tab.2 Energy value in every load node

负荷节点	能量函数值	负荷节点	能量函数值
3	0.128 79	18	0.831 32
4	0.151 47	19	0.855 8
7	0.272 87	20	0.905 24
10	0.458 69	21	0.890 45
12	0.582 88	23	0.993 9
14	0.693 11	24	0.922 72
15	0.723 26	26	0.826 28
16	0.764 72	29	0.921 05
17	0.783 3	30	0.937 87

(3) 区域电网无功能力指标计算

利用各个节点的电压和静态能量函数值, 结合式(10)和式(11), 计算整体无功能力评价指标和节点实时无功能力评价指标。

IEEE-30 节点标准测试系统的整体无功能力评价指标 λ 为:

$$\lambda_{total} = 12.643 72$$

此时, 系统无功设备全部投入, 系统达到临界情况, 反映区域电网最大无功能力。

系统临界情况下, 节点实时无功能力评价指标 η 见表 3。

表 3 节点实时无功能力评价指标表

Tab.3 Reactive power capability in every load node

负荷节点	实时无功能力指标 η	负荷节点	实时无功能力指标 η
3	7.403 137	18	1.054 48
4	6.145 837	19	1.019 561
7	3.364 349	20	0.968 528
10	1.947 11	21	0.967 275
12	1.606 214	23	0.838 756
14	1.309 287	24	0.833 85
15	1.230 139	26	0.605 424
16	1.189 442	29	0.723 012
17	1.138 606	30	0.715 952

3.2 数据分析

在对仿真模型无功能力指标的计算中可以看出, 在保证电压稳定条件下, 当系统电压崩溃时,

由于并不一定所有负荷节点的电压都已达到临界值,因此各个节点所计算出的能量函数值并不都是极限能量函数值。由表1可以看出,当系统负荷增加时,由电压降落可知,如23、24、26、29、30节点,电压下降比较严重,为系统的薄弱节点,由表2可知这些薄弱节点其能量函数值较大,符合式(5)的理论公式推导,规律明显。而对于靠近发电机的负荷节点2、4、7,由于靠近发电机,电压支撑较强,对应较小能量函数值,其它节点视其具体电压值对应相应的能量函数。另外,需要特别指出的是,在仿真中稳定运行点的选取对结果会造成影响,使得在某些情况下式(5)所证明的规律性不是十分明显。

由结果可以看出,整体无功能力评价指标 λ 能很好而直观地反映区域电网整体的无功能力。

引入节点实时无功能力评价指标 η 之后可见,在电压下降严重的节点对应的 η 值很小,说明该区域无功能力已经很弱,而在电压相对较高的节点, η 值较大,说明该节点还有一定的无功能力。可以很好反应出各个节点的实时无功能力,验证了本文方法的有效性。

4 结论

本文在基于静态能量函数的思想,建立了两个无功能力评价指标,分别用来评价区域电网整体无功能力和节点的实时无功能力。并由仿真可知,采用本文方法,可以快速地对当前电网的无功能力作出准确的评估。

这两个指标的建立可以从整体和局部两个方面有效的评价区域电网的无功能力。需要指出的是:虽然两个指标基于相同的数学思想和算法得出,但是却各自独立,彼此之间并没有直接比较关系。

参考文献

- [1] 袁亚湘. 非线性规划数值方法[M]. 上海: 上海科技技术出版社, 1993.54-71.
- [2] 王永刚, 韩学山, 王宪荣, 等. 动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 195-198.
WANG Yong-gang, HAN Xue-shan, WANG Xian-rong, et al. Dynamic Optimal Load Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 195-198.
- [3] 张勇军, 任震, 唐卓尧, 等. 电压无功优化的强多样性遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 18-20.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, TANG Zhuo-yao, et al. Diversity Enhancing Genetic Algorithm for Voltage and Reactive Power Optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 18-20.
- [4] Ponnambalam K, Quintana V H, Vannelli A. A Fast Algorithm for Power System Optimization Problems Using an Interior Point Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 8(3): 892-899.
- [5] Singh H, Alrarado F L. Weighted Least Absolute Value State Estimation Using Interior Point Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1478-1484.
- [6] 刘明波, 陈学军. 电力系统无功优化的改进内点算法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(5): 33-36.
LIU Ming-bo, CHEN Xue-jun. Improved Interior Point Method for Reactive Power Optimization in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(5): 33-36.
- [7] Wei H, Sasaki H, Yokoyama R. An Application of Interior Point Quadratic Programming Algorithm to Power System Optimization Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 260-266.
- [8] Granville S, Meillo J C, Meio A C G. Application of Interior Point Methods to Power Flow Insolvability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 1096-1103.
- [9] 钟世霞, 袁荣湘. 内点法在电力系统中的应用述评[J]. 高电压技术, 2005, 31(17): 76-79.
ZHONG Shi-xia, YUAN Rong-xiang. An Application of Interior Point Method in Optimization of Power Systems[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12): 76-79.
- [10] Hsiao Y T, Liu C C, Chinang H D, et al. A New Approach for Optimal VAR Sources Planning in Large Scale Electric Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1024-1032.
- [11] Glover F. Tabu Search: Part I [J]. ORSA Journal on Computing, 1989, (1): 190-206.
- [12] Glover F. Tabu Search: Part II [J]. ORSA Journal on Computing, 1990, (2): 4-32.
- [13] Hsu Y Y, Ho K L. Voltage Control Using a Combined Integer Linear Programming and a Rule Based Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 744-751.
- [14] 赵涛. 基于混沌算法的电力系统无功优化模型研究(硕士学位论文)[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.6-20.
- [15] 张纪会, 徐心和. 一种新的进化算法—蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 1999, (3): 84-87.
ZHANG Ji-hui, XU Xin-he. A New Evolutionary Algorithm-Ant Colony Algorithm[J]. System Engineering Theory & Practice, 1999, (3): 84-87.
- [16] 林昭华, 侯云鹤, 熊信银, 等. 广义蚁群算法用于电力系统无功优化[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(2): 6-9.
LIN Zhao-hua, HOU Yun-he, XIONG Xin-yin, et al. Generalized Ant Colony Optimization Algorithm for Reactive Power Optimization in Power Systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(2): 6-9.

(下转第28页 continued on page 28)

表 4 为中性点电阻不同对过电压倍数的影响。过渡电阻一定, 中性点接地电阻对弧光过电压倍数影响较大。接地电阻越大, 过电压倍数越大。

4 结论

本文对中性点不接地系统中弧光接地过电压现象进行了仿真研究。针对以往仿真时, 利用时间控制开关模型不够准确的特点, 提出了一种新的开关控制方法。利用 EMTP 中的 MODELS 控制系统算法语言, 通过编程实现对开关的控制。由于算法较灵活, 利用系统中的电压、电流作为判别电弧熄灭和重燃的条件, 而不必局限于一个工频周期的时间假定, 提高了仿真模型的精度, 更接近于真实情况, 为进一步研究弧光接地过电压奠定了基础。

参考文献

[1] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京:水利电力出版社, 1988.
 [2] 陈维贤. 电力系统内部过电压[M]. 北京:中国工业出版社, 1965.
 [3] 平绍勋. 电力系统内部过电压保护及实例分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
 [4] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社, 2000.
 [5] 张作琴, 李敬兆. 电力系统弧光接地保护的研究[J]. 电力科学与工程, 2002, (4).
 ZHANG Zuo-qin, LI Jing-zhao. Study of Arc Grounding Protection of Power System [J]. Electric Power Science and Engineering, 2002, (4).
 [6] 汤新光, 杜庆斌. 低压配电网中性点接地方式的仿真[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(3):27-30.
 TANG Xin-guang, DU Qing-bin. Simulation of the Low-voltage Distribution Network Neutral Grounding Mode [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(3):

27-30.
 [7] 靳晓东, 李谦, 王晓瑜, 等. 配电网弧光接地过电压的仿真及分析[J]. 高电压技术, 1994, 20(3):71-75.
 JIN Xiao-dong, LI Qian, WANG Xiao-yu, et al. Simulation and Analysis Arc Grounding Over-voltage in Distribution Network [J]. High Voltage Technology, 1994, 20(3): 71-75.
 [8] 刘连睿. 10~35kV 系统弧光接地过电压的危害及解决办法[J]. 华北电力技术, 1999, (3).
 LIU Lian-rui. Hazards and Solutions Arc Grounding Over-voltage of 10 ~ 35 kV System[J]. North China Electric Power Technology, 1999, (3).
 [9] 高亚栋, 杜斌, 赵峰, 等. 中性点经小电阻接地配电网中弧光接地过电压的研究[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 345-348.
 GAO Ya-dong, DU Bin, ZHAO Feng, et al. Study of Arc Grounding Over-voltage in Neutral Grounding by Small Resistance of Distribution Network [J]. High Voltage Electrical Appliances, 2004, 40(5): 345-348.
 [10] 陈先禄, 田凤兰, 许文强, 等. 非线性电阻限制 10kV 电网弧光接地过电压分析[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(7):38-40.
 CHEN Xian-lu, TIAN Feng-lan, XU Wen-qiang, et al. Analysis of Arc Grounding Over-voltage Limited by Non-linear Resistance in 10kV Power System[J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(7):38-40.

收稿日期: 2008-07-16; 修回日期: 2008-09-22

作者简介:

金恩淑(1972-), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力系统继电保护的研究;
 杨明芳(1981-), 女, 研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: mfhero@163.com
 李卫刚(1980-), 男, 研究方向为电力系统继电保护。

(上接第 23 页 continued from page 23)

[17] 李亚男, 张粒子, 杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1-4.
 LI Ya-nan, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han. Reactive Power Optimization Under Voltage Constraints Margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 1-4.
 [18] Overbye T J, Dobson I. Q-V Curve Interpretations of Energy Measures for Voltage Security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 19(1): 331-337.
 [19] DeMarco C L, Overbye T J. An Energy Security Measure for Assessing Vulnerability to Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 419-425.

[20] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 运用启发式能量函数观点的无功裕度估算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 29-35.
 LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Reactive Power Margin Estimation by the View of the Heuristic Energy Function[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 29-35.

收稿日期: 2008-10-15; 修回日期: 2009-06-11

作者简介:

杨琪(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: qwertins@163.com
 李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究。